

豊田ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理施設の
安全設計について

平成16年12月

日本環境安全事業株式会社
ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会
豊田事業部会

ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会
豊田事業部会委員名簿

- 川本 克也 国立環境研究所循環型社会形成推進・廃棄物研究センター
／適正処理技術研究開発室長
- 主査 田中 勝 岡山大学大学院自然科学研究科／教授
- 副主査 原口 紘丞 名古屋大学大学院工学研究科／教授
- 森 滋勝 名古屋大学先端技術共同研究センター／センター長

目 次

1. 安全設計の概要	i
2. 安全解析の概要	ii
第1 豊田 PCB 廃棄物処理施設における安全設計	1
1. 安全設計概要	1
2. 安全設計の考え方	1
(1) 多重防護構造	1
(2) ユーティリティ対策	6
(3) 災害に対する安全設計	8
(4) 敷地内レイアウト等に関する安全配慮	10
第2 安全解析	11
1. プラント安全解析	11
(1) プラント安全解析の進め方	11
(2) プラント安全解析手法	11
(3) プラント安全解析の検証結果	12
2. ハザード発生頻度の確認（定量解析）	13
(1) 定量解析シナリオの抽出・初期事象の抽出	14
(2) 定量解析の手法	14
(3) 定量解析の検証結果	14
添付資料	
安全設計の基本的な考え方	15

1. 安全設計の概要

1. 1はじめに

豊田PCB廃棄物処理施設の安全設計に際しては、関連法令の遵守に加え、「ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会」報告書の提言内容を反映させることにより、リスクマネジメントの考え方に立ち施設全体の安全性を確保した設計としています。

すなわち、下図に示すようにプロセス安全設計、操業監視システム、フェイルセーフ、セーフティネットという多重防護構造を構築することにより、通常運転時の異常発生及び不可抗力的な自然災害・緊急事態に対しても安全な停止並びに安定した操業への復帰が可能であるとともに、施設外への影響を最小限に抑制する設備設計としています。

更に、施設の安全性と施設外へ与える影響を評価し、その結果を施設設計及び施設運用に活かすことにより安全性の一層の向上を図っています。

1. 2設備設計の基本思想

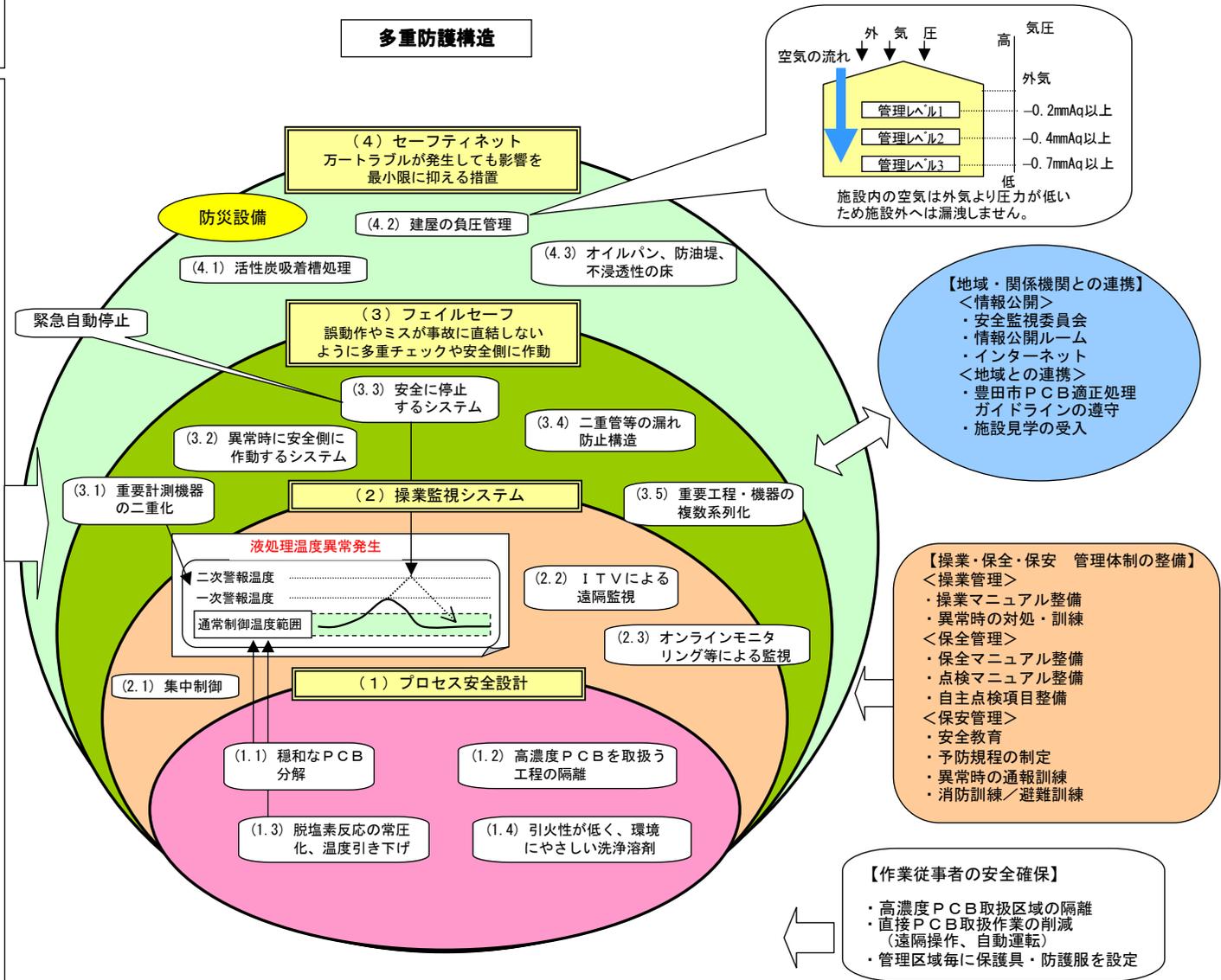
処理システムを構成する設備の特徴、重要度に応じて安全性向上のための措置を実施し、ハザードに対する多重防護を図ります。

1. 3安全設計概要

- 基本思想に基づき安全に配慮した設備設計を行います。
- 豊田施設における安全設計の基本として、①「施設外へのPCB漏洩」、②「施設内での火災・爆発」を潜在ハザードとして選定し、その潜在ハザードの発生頻度を低下させることを前提に多重防護構造を構築しています。
- 安全解析を通して、プロセスの潜在ハザードを洗い出し、問題点を抽出・定量化して、効果的な対策を設計にフィードバックしています。
- PCB廃棄物の搬入経路などレイアウト上の安全配慮、PCB分解反応の安全や漏洩防止に対する設備対策、ユーティリティ設備の安定供給対策を織り込んでいます。
- 災害による緊急事態に対する安全設計については、安全な停止が行えるように適切な対策を織り込んでいます。
- 施設の安全性評価として上記①、②の潜在ハザードを定量化解析しその発生頻度を求め、十分に低いことを確認しています。

◇以下に、右図中の項目に対応した代表的な内容を示す。

- (4) セーフティネットの内容
- (4.1) 排気は排気処理設備で処理した上、更に2重の活性炭吸着槽を通して施設外へ排出。
 - (4.2) 建屋内に管理区域を設定し、管理区分レベル毎に負圧管理。
 - (4.3) PCB油の地下浸透防止のため、設備にオイルパン又はステンレス床を設置し、更に防油堤及び不浸透性塗床等を施工。
- (3) フェイルセーフの内容
- (3.1) 安全上重要な計測機器は二重化又は警報の多重化。
 - (3.2) 停電等の異常時には、自動弁の開閉は安全側に作動するように設計。
 - (3.3) 警報と連動して緊急自動停止ができる設計。
 - (3.4) 高濃度のPCBを移送する配管は二重管等の漏れ防止構造。
 - (3.5) 重要な工程や機器については複数系列化。
- (2) 操業監視システムの内容
- (2.1) 制御室にて集中制御ができるように設計。
 - (2.2) 運転状況の遠隔監視ができるようITVを設置。
 - (2.3) オンラインモニタリングや漏洩検知器による監視。
- (1) プロセス安全設計の内容
- (1.1) PCBの分解には、穏和な反応である金属ナトリウム分散油による脱塩素化分解法を採用。
 - (1.2) 高濃度PCBを取扱う工程の遮蔽フードによる隔離。
 - (1.3) 脱塩素反応条件の常圧化と温度の引き下げ。
 - (1.4) 引火性が低く、環境にやさしい洗浄剤の採用。



2. 安全解析の概要

2 プラント安全解析概要

(1) プラント安全解析の手法

工程等の特性に応じて以下のような手法を用いて安全解析を実施。

設備の名称	工程等	安全解析手法	
		What-if	HAZOP
受入・保管設備	受入、検査、保管	○	○
前処理設備	除塵、抜油	○	○
	予備洗浄、解体前洗浄		○
	解体、分別	○	
	超音波・攪拌・判定洗浄		○
	真空加熱分離、副反応槽、油回収、蒸留		○
	ドレンネットワーク		○
液処理設備	PCB 受入・供給、液処理、後処理	○	○
	固液分離、油タンク		○
保管・払出設備	保管、払出	○	○
排水・排気設備	排水、建屋排気		○
	プロセス設備排気		○
用役設備	冷却水、窒素、計装空気、熱媒		○



(2) プラント安全解析の流れ

<プラント安全設計（多重防護構造）>

リスクマネジメントの考えに立ち、①プロセス安全設計、②操業監視システム、③フェイルセーフ、④セーフティネット機能を加えた多重の対策を講じることによって、施設全体の安全性を高度に確保する多重防護構造を導入して基本設計を実施。



<プラント安全解析(1)>

基本設計後、2,653項目を対象に安全解析を実施し、安全性は十分確保されていることが確認されたが、更なる安全性の向上のため22項目を改善し詳細設計に反映。



<プラント安全解析(2)>

詳細設計に反映された改善案が影響を与えると想定される項目（225項目）について再度安全解析を実施し、安全性を確認。



<ハザード発生頻度の確認（定量解析）>

上記の安全解析でプラントの安全性を確認したが、更に豊田施設において発生するおそれのあるハザードとして「施設外へのPCBの漏洩」、「施設内での火災・爆発」が発生する頻度がほとんど起こりえないことを確認するため、定量解析(ETA、FTA)を実施し評価。



*HAZOP (Hazard & Operability study)

化学プラントを構成する一本のラインまたは機器に着目し、流量、温度といったプロセスパラメータの正常状態からのずれを想定し、そのずれの原因の洗い出しと、ずれが発生した時のプロセスへの影響や適切な安全対策がとられているかを検討する手法。

*What-if

「もし…ならば」という質問を繰り返すことにより、設備面、運転面での潜在危険を洗い出し、それに対する安全対策を講じることによりシステムの安全化を図る手法。

*FTA (Fault Tree Analysis)

対象とするシステムに起こってはならない事象を頂上事象として設定し、頂上事象の発生原因を機器・部品レベルまで次々と掘り下げ、その原因・結果を論理記号（AND、ORなど）で結びつけてツリー状に表現する。次に、頂上事象の発生原因となる機器・部品の故障確率を与えることにより頂上事象の発生確率を解析する手法。

*ETA (Event Tree Analysis)

引き金となる事象が発生した時、対応の成功・失敗を考慮して事象の進展過程をツリー状に表現し、各々の成功・失敗の確率を使って事故に至る発生頻度を解析する手法。

(3) 定量解析結果

<PCBの漏洩>の発生頻度：

PCBの漏洩は、施設内の床に漏洩したものが施設外に漏洩するケースと、排気ラインを通過して施設外漏洩するケースに分類できます。

前者の床への漏洩に対して、セーフティネットとして設備下部にオイルパンの設置、更に防油堤の設置という2重の漏洩防止対策を講じており、現実には施設外への漏洩は起こらないと考え、このケースは定量化の対象にしていません。

従って、後者の排気ラインを通過してPCBが施設外へ漏洩するケースとして、PCBが排気ラインから漏洩するシナリオについて発生頻度を求めました。その結果、 1.2×10^{-9} 回/年 となっています。

<施設内での火災>の発生頻度：

燃焼発生には混合気形成と着火源の存在が必要です。本解析では、運転中に溶剤等の化学薬品を引火点や発火点を超えて使用する可能性がある設備又は水素等の可燃性ガスが発生する可能性がある設備を対象として、その設備の機器故障等による酸素の流入等により爆発混合気形成し、着火源により着火し火災に至るシナリオについて発生頻度を求めました。その結果、 5.3×10^{-7} 回/年 となっています。

通常の危険物一般取扱所における火災の統計的な発生頻度は、施設当たり 10^{-3} 回/年程度なので、上記の発生頻度はこれと比較して十分小さいといえます。

以上のとおり、施設外へ影響を及ぼす<PCBの漏洩><施設内での火災>といった潜在ハザードの発生頻度はいずれも 10^{-6} 回/年 (百万年に1回程度) 以下と極めて低い値となっています。

10^{-6} 回/年以下という発生頻度は、例えば英国のリスク基準において「無視できるリスク」とされ、これ以上のリスク削減の必要がないとされているレベルであり、潜在ハザードの発生頻度としては、十分に低い値といえます。

更に、今回の安全解析結果に基づき、点検チェックリストに基づく重点的な日常点検・保全管理を充実し、設備の安定操業および機器類の異常の早期発見に努めることにより、実際の施設の安全性をさらに高めてまいります。

第1 豊田 PCB 廃棄物処理施設における安全設計

1 安全設計概要

豊田 PCB 廃棄物処理施設（以降、豊田施設と略す。）は、関連法令を遵守するとともに、ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会の提言事項をもとにリスクの回避と低減を目指した施設設計とするため、安全解析に基づいたリスクマネジメントの考えに立った①プロセス安全設計、②操業監視システム、③フェイルセーフ、④セーフティネットの4つの安全対策で構成された多重防護構造を導入した。さらに、施設設計段階において安全解析を実施し、多重防護構造を取り入れた施設設計において安全性が確保されていることを確認するとともに、より高い安全性を確保する観点から設計上及び運転管理上改善すべき点を見だし、その結果を設計及び運転管理に反映させることとした。また、通常運転時に想定される様々な異常発生に加え、不可抗力による自然災害や緊急事態を想定した中で、施設が安全に停止でき、かつ施設外への影響を最小限に抑える設計を行った。

豊田施設における安全設計の主な特徴は、次の5点である。

- ① 高濃度 PCB を取扱う工程の隔離（遮蔽フードによる隔離と解体・洗浄工程の機械化）
- ② ナトリウム分散油（SD）によるマイルドな脱塩素化反応
- ③ 脱塩素化反応条件の常圧化と温度の引き下げ
- ④ トリクロロベンゼンの分離によるベンゼン（有害物質）生成の低減
- ⑤ 洗浄能力が高く、引火性が低く、環境への影響が少ない洗浄溶剤を採用

2 安全設計の考え方

豊田施設における安全設計の基本として2つの潜在ハザード、①「施設外への PCB 漏洩」、②「施設内での火災・爆発」を低下させることを前提に多重防護構造を構築した。

また、通常運転時に想定される異常発生に加えて、不可抗力による自然災害を想定し、施設外への影響を最小限におさえる設計とした。

(1) 多重防護構造

多重防護構造とは、図 1-1 に示すように、リスクマネジメントの考え方から、①本質的に安全な処理プロセスとなるような「プロセス安全設計」を基本として、②その操業を監視する「操業監視システム」、③さらに機器の故障やヒューマンエラーが事故につながらないような「フェイルセーフ」機能、④万が一トラブルが発生しても影響を最小限に抑える「セーフティネット」機能を加えた多重の対策を講じることによって、施設全体の安全性を高度に確保しようとするものである。

豊田施設の施設設計に多重防護構造の考え方を導入し、施設の安全性を高度に確保するとともに、地域住民・関係機関との連携を高めるために「情報公開」等の実施にも配慮する。

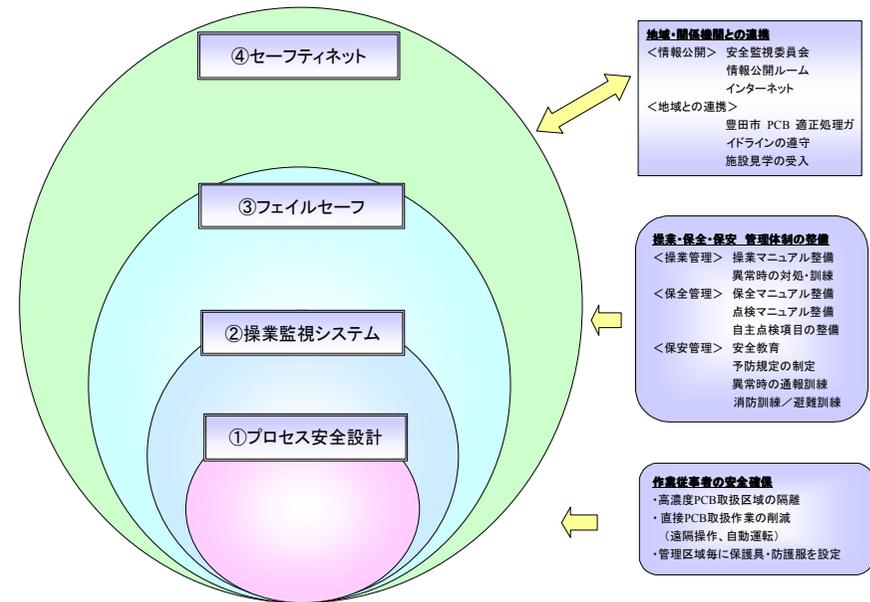


図 1-1 多重防護構造の概要

ア プロセス安全設計

リスクマネジメントの考え方に立ち、本質的に安全な処理プロセスとなるような「プロセス安全設計」を設計構想時に導入することで、リスクを未然に低減させる対策を実施した。

- ・プロセス安全設計として、洗浄溶剤の選定に関する実施例を次に示す。「施設内での火災・爆発」及び「施設外への PCB 漏洩」の潜在ハザードを削減するため、表 1-1 に示す5つの選定ポイントにより検討をした。

表 1-1 プロセス安全設計の具体例（洗浄溶剤の選定ポイント）

	選定手順（選定ポイント）
①	引火点が比較的高いこと
②	洗浄力が高いこと
③	人体及び環境への負荷が小さい炭化水素系溶剤であること
④	分解反応に使用する薬剤と反応しないこと
⑤	極力単一物質からなり、蒸留分離性（PCB、トリクロロベンゼンとの分離性）がよいこと

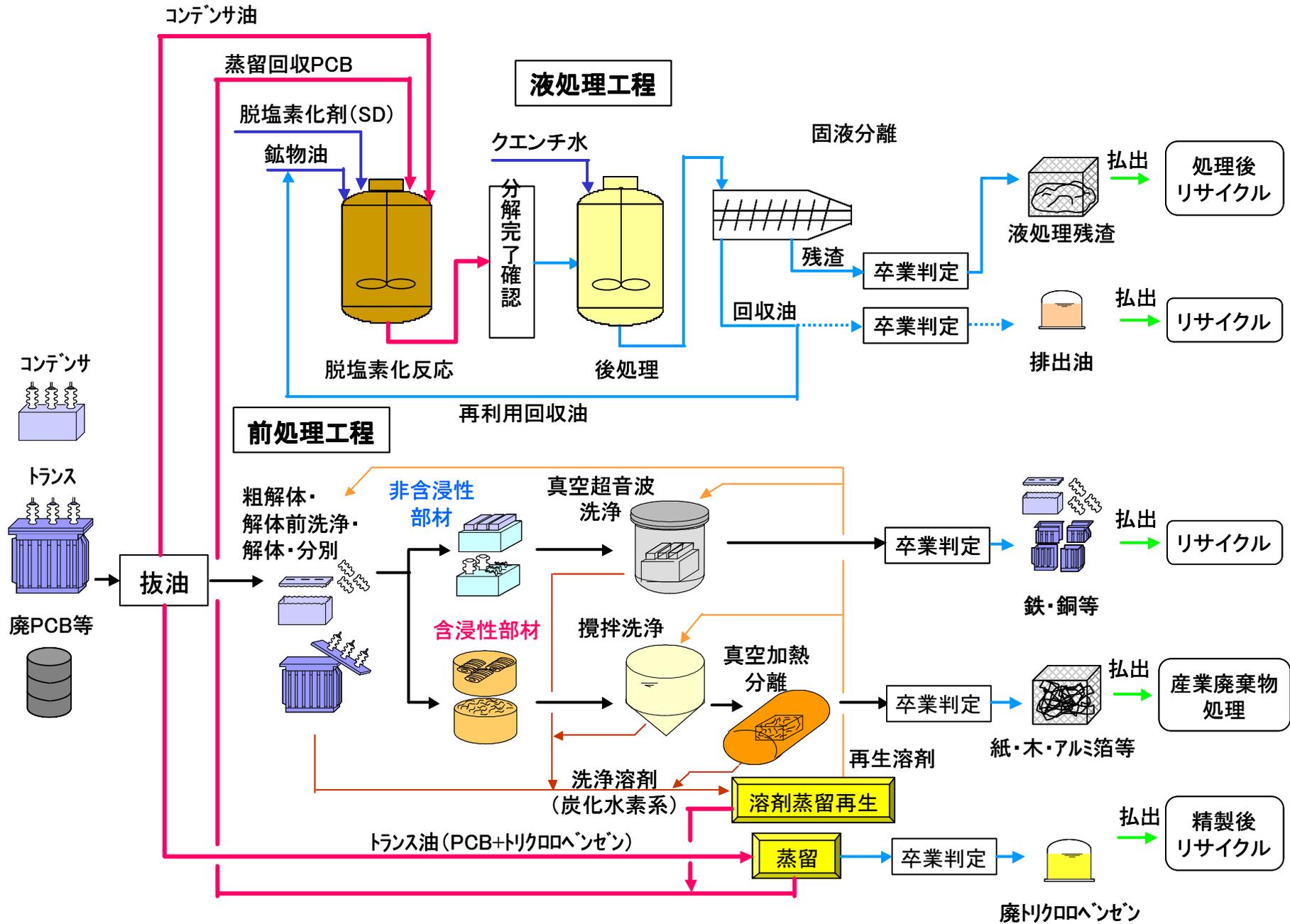


図 1-2 豊田施設フロー図

・PCB 廃棄物の洗浄溶剤の選定は、上記選定ポイントに基づき、安全性、洗浄性、反応安定性、蒸留分離性の優れた C13 n-パラフィンを採用する。表 1-2 にその検討結果を示す。

表 1-2 プロセス安全設計の具体例（洗浄溶剤の物性表）

洗浄溶剤比較対象		C11n- α パラフィン	C11+C12n- α パラフィン	C13n- α パラフィン	パーカロレチレン
基本物性	密度(g/cm^3) (15°C)	0.744	0.745	0.752	1.623(15°C)
	動粘度(cS) (20°C)	1.59	1.66	2.47	0.88
	表面張力(mN/m) (20°C)	24.7	24.9	26.0	32.3
	流動点(°C)	-25.0	-22.5	-5.0	-22.4
	沸点(°C)	190	191~207	227	121
	蒸発潜熱(J/g)	265.4	263.8	257.5	209.0
	比熱(kcal/kg°C) (20°C)	0.52	0.52	0.52	0.21
安全性	引火性評価	Δ	Δ	\bigcirc	\odot
	引火点(°C)	68	70	102	なし
	消防法分類	第2石油類	第3石油類	第3石油類	該当せず
	環境負荷評価	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	Δ
	労働安全衛生法	該当せず	該当せず	該当せず	第2種有機溶剤
	PRTR法	該当せず	該当せず	該当せず	第1種指定化学物質
洗浄性	洗浄性評価	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
	PCB除染	可能	可能	可能	可能
	洗浄方式	浸漬洗浄 攪拌・超音波	浸漬洗浄 攪拌・超音波	浸漬洗浄 攪拌・超音波	浸漬洗浄 蒸気洗浄
反応安定性	反応安定性評価	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\times
	反応薬剤(SD)との反応	反応なし	反応なし	反応なし	反応あり(SD消費)
蒸留分離性	蒸留分離性評価	\times	\times	\bigcirc	\bigcirc
	PCBとの分離	可能	可能	可能	可能
	TCBとの分離	困難	困難	可能	可能
総合評価		\times	\times	\bigcirc	\times

イ 操業監視システム

操業監視システムは、処理施設の運転状況を監視する分散型制御システム (DCS) と運転状況データを収集管理する操業管理システムから構成されている。

・操業監視システムは、監視及び制御の信頼性を高めるため、中央演算処理装置 (CPU) の多重化、分散型制御システム (DCS) 電源カードの二重化、ディスプレイの冗長化、制御ローカルエリアネットワーク (LAN) の二重化、重要な計測機器の二重化を行うとともに、停電時には無停電電源装置 (UPS) 又は非常用発電機による電源確保を行う。これらを行うことで制御システムの異常発生を防止する (図 1-3)。

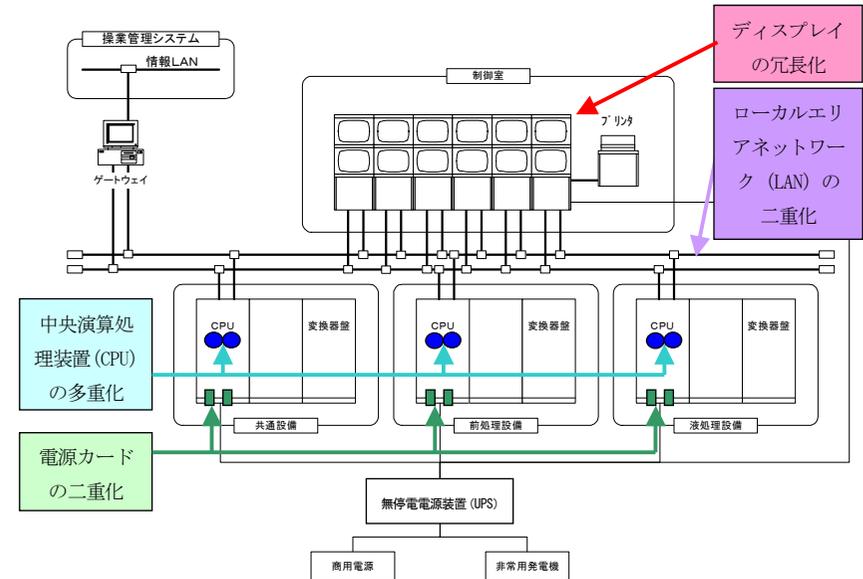


図 1-3 操業監視システムの制御システム

・分散型制御システム (DCS) は自動運転状態での監視及び制御のみならず、マニュアルモードにおける運転においても異常運転につながらないように監視する。また、緊急時は緊急停止モードを装備しシステムを安全に停止する。溶剤蒸留再生工程における分散型制御システム (DCS) による制御例を表 1-3 に示す。

表 1-3 分散型制御システム (DCS) による溶剤蒸留再生工程の監視・制御

<スタートアップ>	
蒸留システムのスタートアップは、分散型制御システム (DCS) のマニュアルモードにて、制御室より以下の操作を行う。マニュアルモードにおいても、インターロック等を設定し、異常発生を未然に防止する。	
(1)	各塔ごとに①液の張込 (ポンプ起動、流量制御、レベル制御) ②塔内圧力の調整 (窒素パージ、真空ポンプの起動、系内圧力制御) ③全還流による蒸留塔の立ち上げ (還流の開始、リボイラーへの熱媒供給、塔内温度分布の制御) をする。
(2)	続いて、各蒸留系統のつなぎ込みとシステム全体の調整をする。
(3)	全体の操業状況が安定した後、オートモードへ切り替えることとし、全自動操業へ移行する。
<定常状態の監視>	
(1)	定常状態では、分散型制御システム (DCS) が各塔の温度、圧力、液レベル、流量各値の信号を受け、正常範囲内にプロセスの状態が安定するよう各調節弁を自動的に制御する。
(2)	正常範囲内の上下限に近づいた場合には、分散型制御システム (DCS) は警報を出し、作業従事者の注意を喚起するとともに、正常範囲に戻すためのガイダンスを表示する。

＜シャットダウン＞	
(1)	計画的なシャットダウンでは、分散型制御システム（DCS）のマニュアルモードにて、制御室より、①各系統内の蒸留塔の切り離しと各塔全還流運転、②熱源供給停止を行い、安全にシステムを停止する。
(2)	緊急シャットダウンでは、プロセスが正常範囲を超える危険な状態に陥った際に、DCS内に予め整備されたインターロックシステムが作動し、システムを安全に停止する。

ウ フェイルセーフ

1つの故障やヒューマンエラーがあってもそれが事故に直結することがないように多重チェック機能を持たせ、安全サイドに移る制御とする。

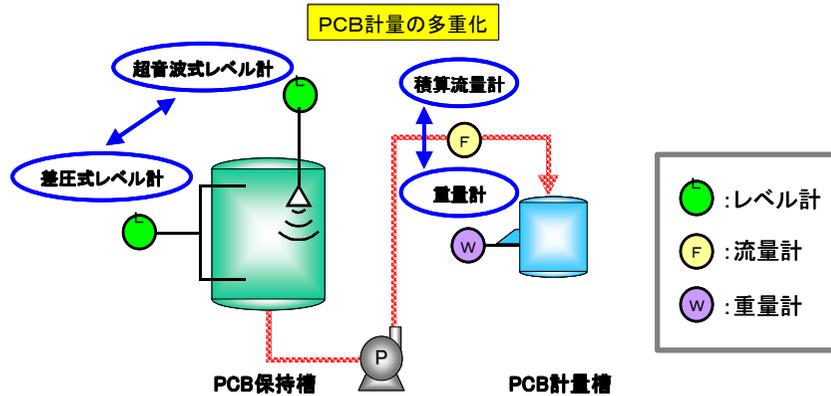


図 1-4 フェイルセーフの具体例

・安全上重要な装置については、計測機器の二重化を行う。例えば、液処理装置に PCB を供給する PCB 計量槽及び PCB 保持槽における PCB 計量の二重化は、異なる計量方法を用いた PCB 計量機器を採用する。

DCS において二重化した計測機器についての出力を常時比較し、両方の測定値に異常がないことを確認することで、計量装置故障を早期に発見するとともに PCB が槽からオーバーフローすることを未然に防止する（図 1-4）。

エ セーフティネット

万が一トラブルが発生しても系外への影響を最小限に抑える措置を講じている。PCB の地下浸透防止と排気中からの PCB 漏洩防止に関して実施したセーフティネットの具体例を図 1-5 に示す。

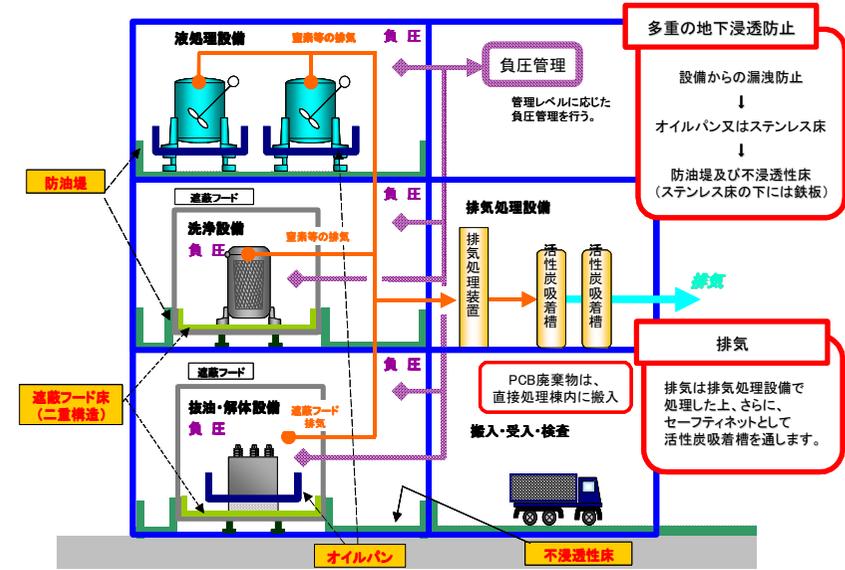


図 1-5 セーフティネットの具体例

・PCB 漏洩防止のため、設備にオイルパン又はステンレス床を設置し、さらにセーフティネットとして以下の対策を実施した。

- ① 遮蔽フード：遮蔽フード内は、ステンレス床の下に鉄板を張り二重構造とした。
- ② その他：PCB 管理区域周囲及び建築床に防液堤を設置するとともに床は浸透防止のため不浸透性のエポキシ塗装とした。

・PCB（排気）漏洩防止のため、排気は排気処理装置において処理したのち、更にセーフティネットとして活性炭吸着槽を通した後に施設外に排気する。

オ 多重防護構造の実施結果

豊田事業では、「PCB の漏洩」と「火災・爆発」を想定フェイルとして「プロセス安全設計」、「操業監視システム」、「フェイルセーフ」、「セーフティネット」の多重防護構造を構築した。本事業の「液処理」を例とした多重防護の実施例を図 1-6 に示した。

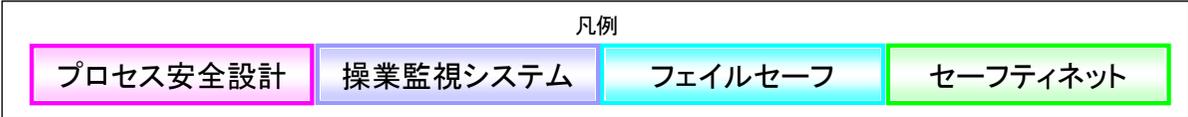
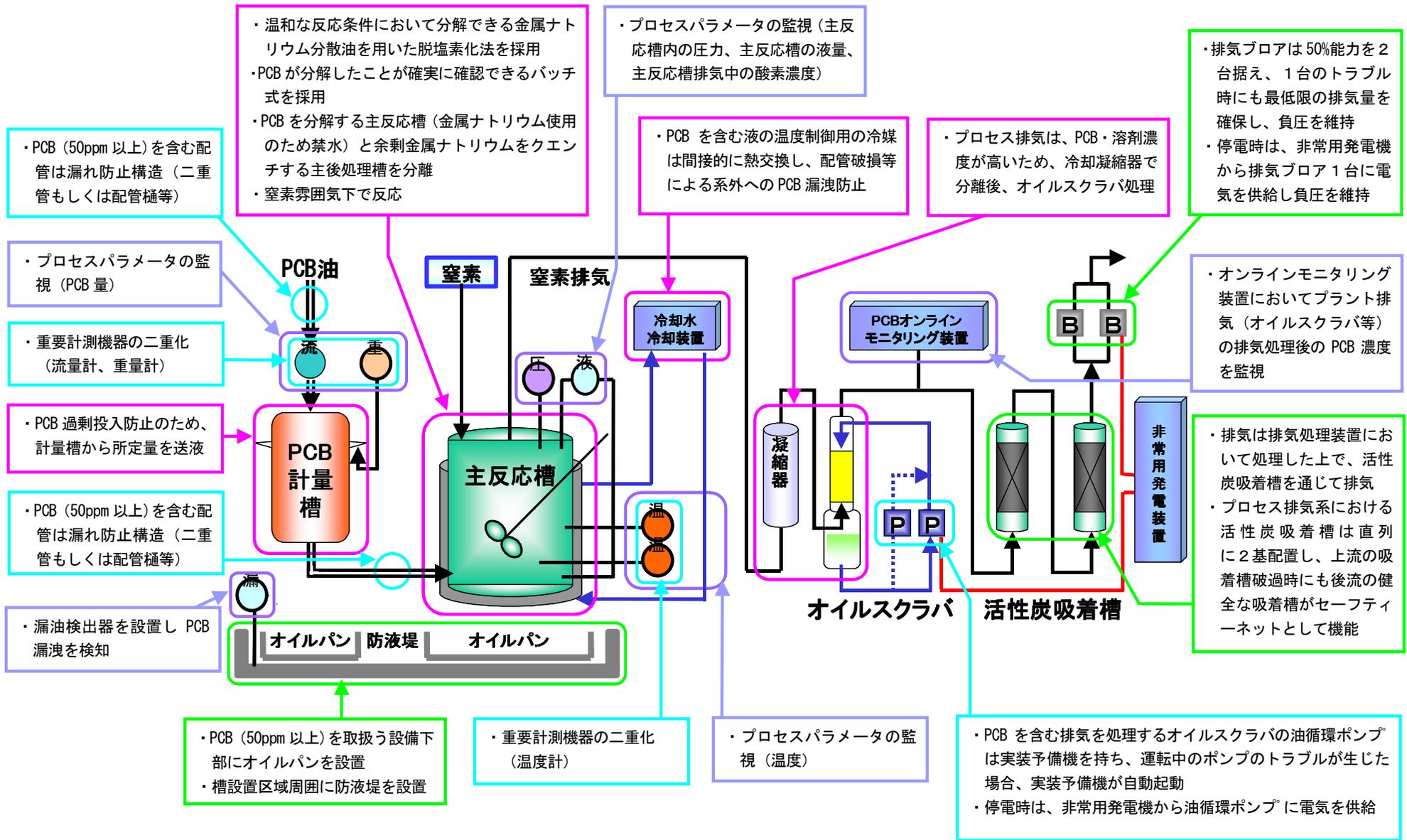


図 1-6 多重防護対策の実施例

(2) ユーティリティ対策

ア 電気

施設内に非常用発電機及び無停電電源装置を設置し、停電時において施設を安全に停止するため及び施設の安全性を維持するための設備を稼働する。

- ・ 停電時の電源確保のため、無停電電源装置・非常用発電機を設置
- ・ 制御システムの継続運転及び安全停止のために電源供給が必要な設備に対して非常用発電機又は無停電電源装置
- ・ 非常用発電機の燃料は、停電時に安全操業上運転の必要がある設備機器の稼働及び安全停止するために必要な量を施設内に確保
- ・ 作業従事者等が安全に避難するために非常電源を内蔵した非常照明、誘導灯を設置

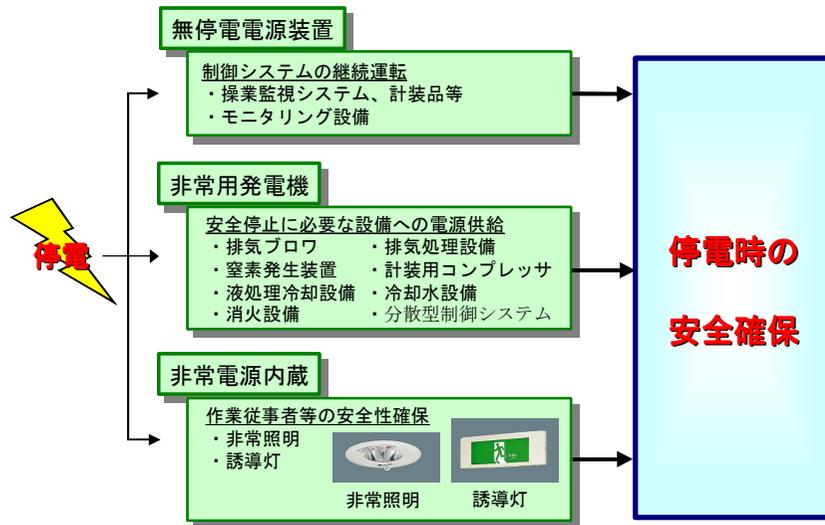


図 1-7 停電対策

イ 工業用水

施設の安全停止のために必要な工業用水（安全停止用用水）は、施設内に設置した受水槽において確保する。

安全停止用用水を確保できないおそれがある場合は、施設を安全に停止する。

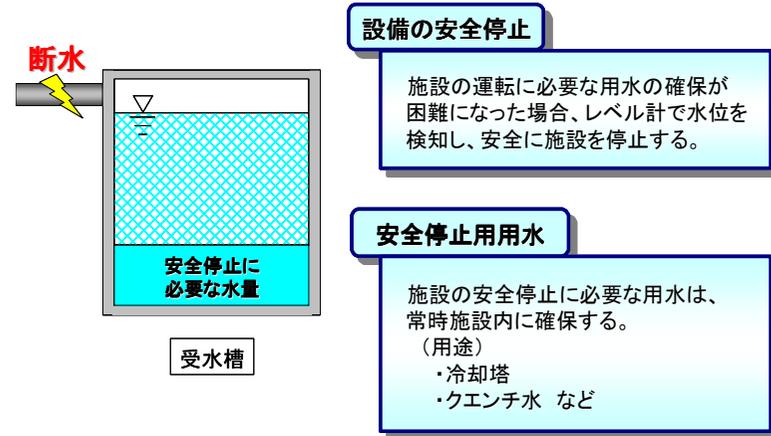


図 1-8 工業用水の断水対策

ウ 窒素

設備に窒素を安定的に供給するため、複数台（3台）の窒素発生装置および均圧供給用のバッファ槽を設置し、酸素濃度及び圧力を監視する。

また、窒素ガスは塔・槽類のシール及び液体の圧送に使用されるが、停電時には3台のうち1台が非常用発電機から受電し、設備を安全に停止させるために必要なシール用窒素を供給する。

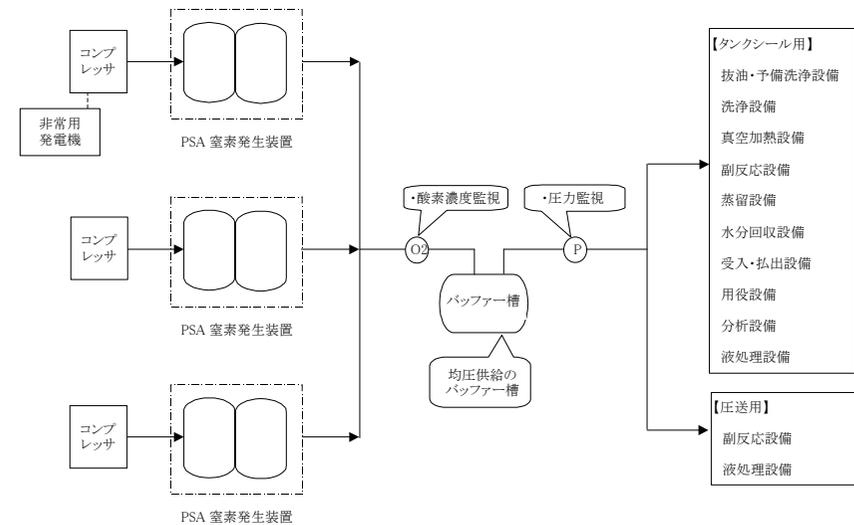


図 1-9 窒素の安定供給対策

エ 計装用空気

設備に計装用空気を安定的に供給するため、複数台（2台）の計装空気用コンプレッサー及び均圧供給用のバッファ槽を設置し、圧力を監視する。

また、計装空気は計装と装置駆動に使用されるが、停電時には2台のうち1台が非常用発電機から受電し、設備を安全に停止させるために必要な計装空気を供給する。

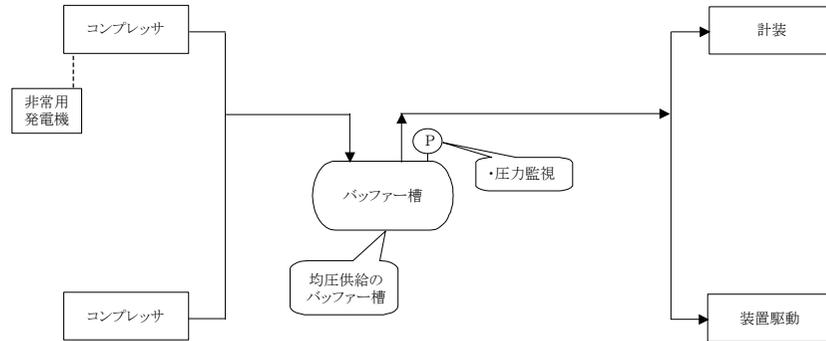


図 1-10 計装用空気の安定供給対策

オ 冷水

設備に冷水を安定的に供給するため、複数台（3台）のチラーユニット及び負荷変動吸収用のバッファ槽を設置し、温度及び流量を監視する。

また、停電時には3台のうち1台が非常用発電機から受電し、設備を安全に停止させるために必要な冷水を供給する。

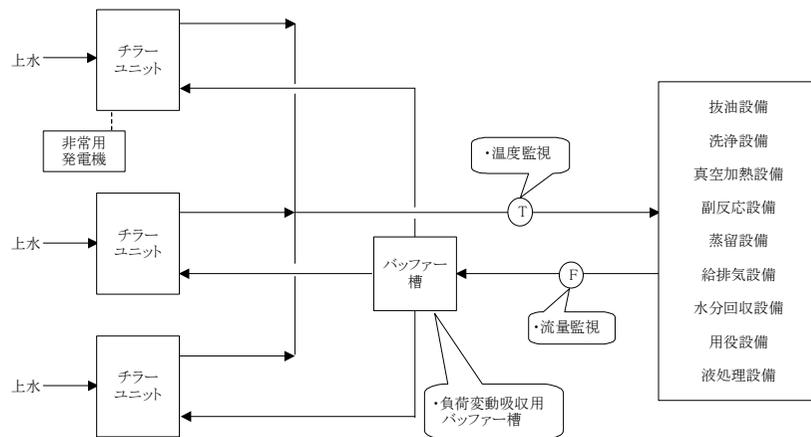


図 1-11 冷水の安定供給対策

カ 冷却水

冷却塔（冷却水）は、プロセス用（密閉型）と PCB との接触が想定されないユーティリティ用（開放型）の2系統に分かれている。安定的に冷却水を供給するため、両系統ともに冷却塔を複数台設置し、温度及び流量を監視する。

また、停電時には、プロセス用は2台、ユーティリティ用は1台の冷却塔が非常用発電機から受電し、設備を安全に停止させるために必要な冷却水を供給する。

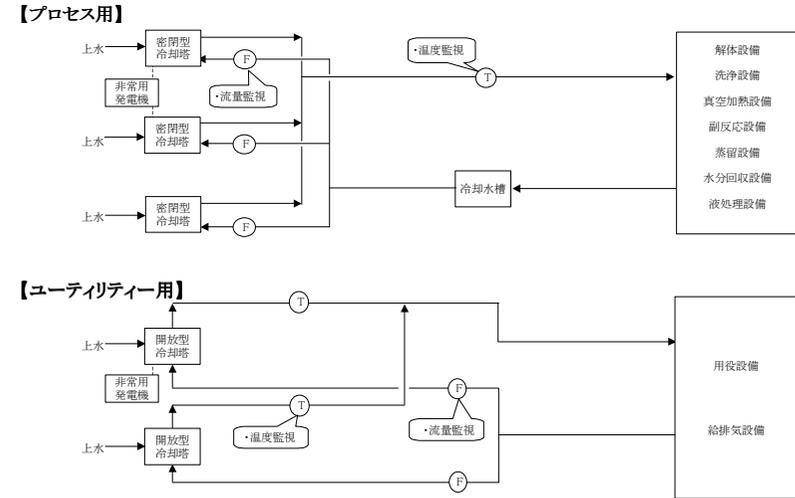


図 1-12 冷却水の安定供給対策

キ 熱媒

設備に熱媒を安定的に供給するため、複数台（2台）の熱媒ボイラーを設置し、温度及び流量を監視する。

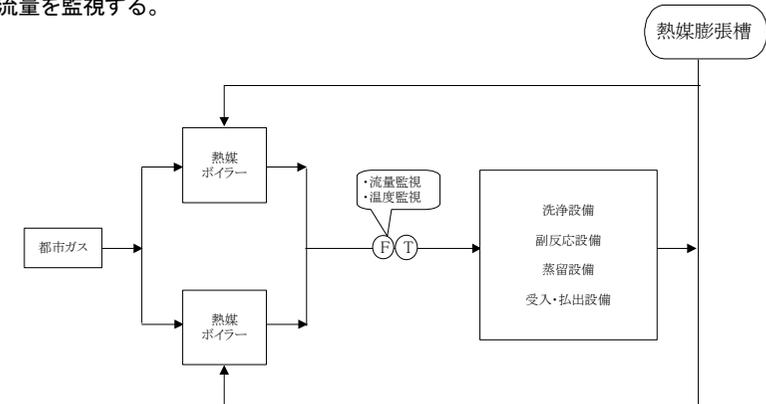


図 1-13 熱媒の安定供給対策

(3) 災害に対する安全設計

ア 地震

地震発生時の対応

- ・設定震度以上の場合

警報を発するとともに機器を安全に緊急自動停止

対応マニュアルに従った現場確認を行い、安全が確保されていることを確認した上で施設を稼動する。

- ・設定震度未満の場合

対応マニュアルに従い現場において点検・確認を実施し、安全が確保されていることを確認する。

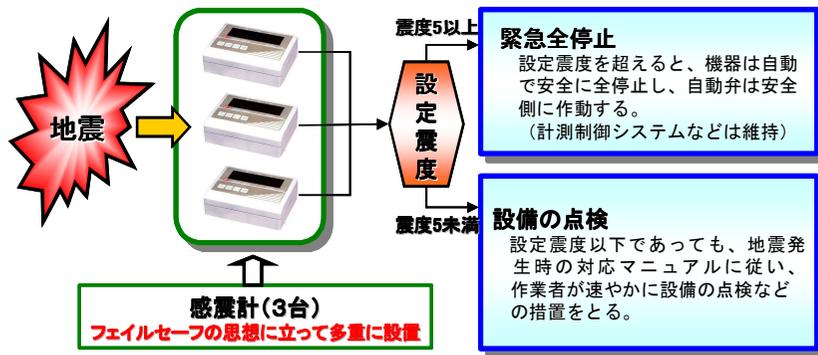


図 1-14 災害に対する安全設計 (地震)

地震対策として、基礎構造は液状化現象を考慮した基礎構造設計、建物構造は建築基準法施行令第8条に準拠するとともに層せん断力係数は法定値の1.5倍とした。

この層せん断力係数は、愛知県豊田市における東海地震予測値(中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」第8回説明資料 平成15年2月4日)の1.5倍の耐震性に相当する。

イ 浸水

逢妻男川の護岸高は、30年に1回起こる可能性のある時間あたり76mmの降雨量に対応できる高さとなっている。更に、①計画地盤を護岸高から1100mm以上嵩上げ、②処理棟1階(処理ゾーン)床高さを計画地盤高さから+1300mmに設定し、屋外からの施設内への浸水を防止する。その上、③処理ゾーン1階に腰壁、防油堤を設置しており、より高い浸水対策が確保されている。

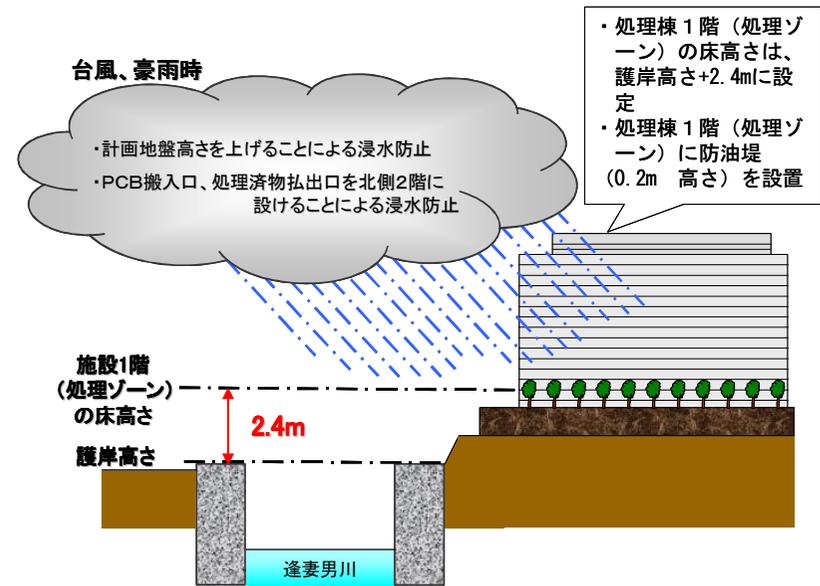


図 1-15 災害に対する安全設計 (浸水)

エ 落雷

建築基準法及び消防法に従い、管理・処理棟及び非常用発電機棟に落雷対策を実施する。避雷導体は、以下のとおり設置する。

- ・屋上部分の棟上導体は水平方向に10m間隔で設置
- ・壁部分の引下導体は15m間隔で設置

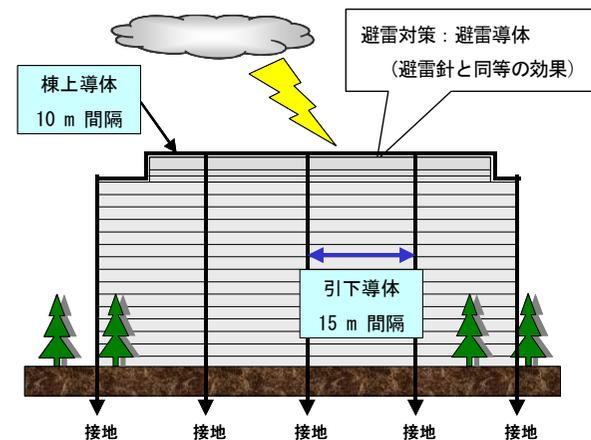
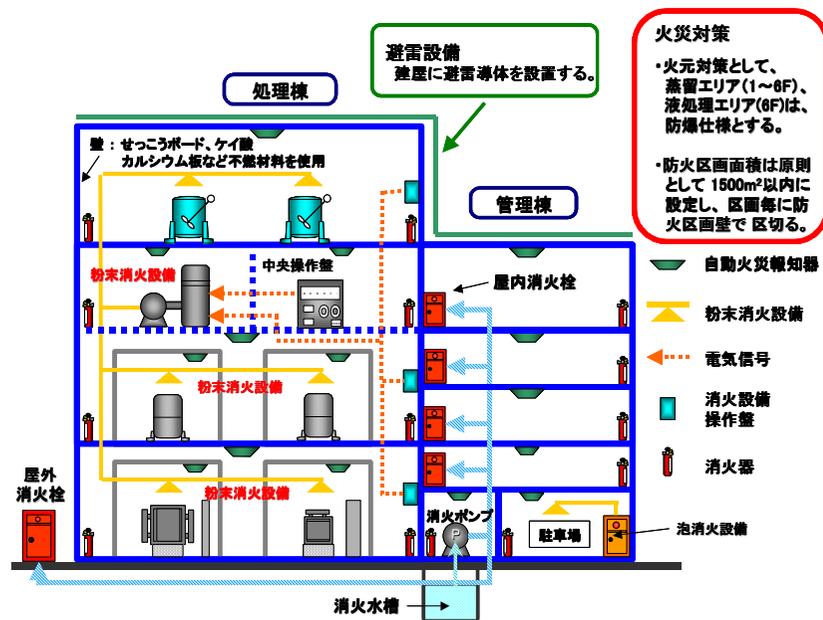


図 1-16 災害に対する安全対策 (落雷)

オ 火災

火災に対する対策は、以下のとおりとする。

- ・ 引火防止 : PCB 処理に使用する溶剤等化学薬品は引火点の高い危険物第 4 類第 3 石油類を採用
 避雷設備を設置
 危険物を引火点以上で扱うエリアは防爆仕様
 配管、機器類は接地施工
- ・ 防火 : 基本的に床面積 1500 m² 毎に防火区画壁により区切りを設置
 防火区画壁は、ケイ酸カルシウム板とせっこうボードの不燃材料を用いた二重張り構造
 防火区画壁以外の一般壁は、ケイ酸カルシウム板等の不燃材料
- ・ 警報設備 : 自動火災報知設備を設置
- ・ 消火設備 : 屋内消火設備として、屋内消火栓、消火器、泡消火設備及び粉末消火設備を各部屋の特性にあわせて設置
 屋外消火設備として、屋外消火栓を設置



第2 安全解析

1 プラント安全解析

(1) プラント安全解析の進め方

プラント施設の設計について安全性が担保されていることを確認するため実施したプラント安全解析の概要を図2-1に示す。

設計企画段階では、多重防護構造を十分考慮した基本設計図書を作成する。安全解析(1)では、この基本設計図書を対象にWhat-if、又はHAZOP (Hazard and Operability Study) を基に、追加的にリスクレベル^(※)評価を実施する。もし、リスクレベル2以上の個所があれば設計変更を実施する。安全解析(2)では、設計変更を反映して作成した詳細設計図書を対象にリスクレベル評価を実施し、安全性の再確認をする。安全解析(3)では、安全解析(2)でリスクレベル2以上に区分された潜在ハザードについて、定量的な安全解析を行い十分な安全が確保されていることを確認する。

以上の各段階におけるプラント安全解析の実施方針を表2-1に示す。

・What-if

「もし・・・ならば」という質問を繰り返すことにより、設備面、運転面で潜在危険を洗い出し、それに対する安全対策を講じることによりシステムの安全化を図る方法。

プラント安全解析におけるWhat-ifでは、リスクマトリックスによるリスクレベル評価を追加する。

・HAZOP (Hazard and Operability Study)

化学プラントを構成する一本のライン又は機器に着目し、流量、温度といったプロセスパラメータの正常状態からのずれを想定し、そのずれの原因の洗い出しと、ずれが発生した時のプロセスへの影響や適切な安全対策がとられているかを検討する手法。

プロセス安全解析におけるHAZOP解析では、通常のHAZOPにリスクマトリックスによるリスクレベル評価を追加する。

(※) リスクレベルは、潜在ハザードが発生した際の「影響の大きさ」と「発生の可能性」をもとにリスクマトリックス ([12頁 表2-3 リスクマトリックス]参照) を用いて当該ハザードのリスクの大きさを区分したものである。プラント安全解析では、リスクレベルを次のように定義する。

リスクレベル1：十分な安全対策がとられているレベル

リスクレベル2：詳細検討を実施し、その結果によっては設備の設計変更が必要なレベル

リスクレベル3：設備の設計変更が必要なレベル

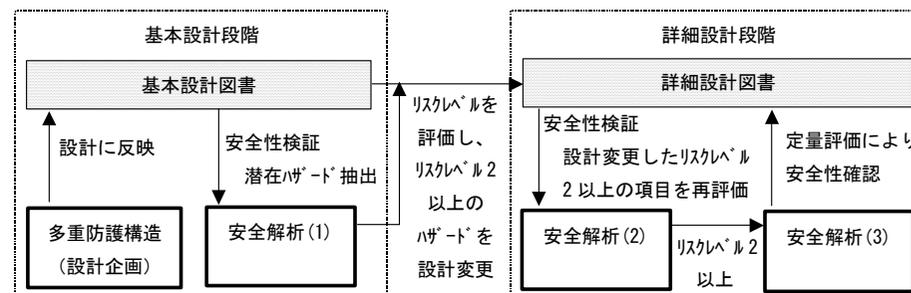


図2-1 豊田PCB廃棄物処理施設におけるプラント安全解析の概要（概念図）

表2-1 プラント安全解析における実施方針

段階	実施方針
設計企画における検討 多重防護構造	基本設計において施設を構成する設備の特性・重要度に応じた安全対策及び潜在ハザードに対して多重防護対策を実施。
基本設計における確認 安全解析(1)	基本設計図書をもとに、安全解析を実施。リスクマトリックスを用いてリスクレベルを評価し、リスクレベル2又は3の潜在ハザードについて改善対策を検討し、その内容を詳細設計に反映。
詳細設計における確認 安全解析(2)	安全解析(1)の結果を反映させた詳細設計図書に基づくリスクレベル2以上の改善対策を実施した項目に対して、再度リスクレベルが低下（すべてリスクレベル1又は2になっていること）していることを確認。
発生頻度の定量評価 安全解析(3)	安全解析(2)の結果、リスクレベル2に区分された潜在ハザード(該当なし)について、定量的な安全解析を実施し、発生頻度が十分低いことを確認。

(2) プラント安全解析手法

豊田施設の工程は、PCB廃棄物の解体工程などの人手による作業と蒸留工程などの化学プラント設備（プロセス設備）が混在しているため、複数の安全解析手法から各工程に適する手法を選択し、安全解析を実施した。

・各設備と解析手法

安全解析(1)、(2)では、What-if、HAZOPのいずれかの手法を用いた。

作業従事者が介在する頻度の高い工程はWhat-ifを用いた。

プロセス設備が主体である施設はHAZOP (Hazard and Operability Study) を用いた。各設備と解析手法の関係を表2-2に示す。

表 2-2 プラント安全解析における安全解析手法の選択

設備の名称	作業区分	安全解析(1)、(2)※		安全解析(3)
		What-if	HAZOP	CCA※2等
受入・保管設備	受入、検査、保管	○	○	○
前処理設備	除塵、抜油	○	○	○
	予備洗浄、解体前洗浄		○	○
	解体、分別	○		—
	超音波・攪拌・判定洗浄		○	○
	真空加熱分離、副反応槽、油回収、蒸留		○	○
	ドレンネットワーク		○	○
液処理設備	PCB 受入・供給、液処理、後処理	○	○	○
	固液分離、油タンク		○	○
保管・払出設備	保管、払出	○	○	○
排水・排気設備	排水、建屋排気		○	○
	プロセス設備排気		○	○
用役設備	冷却水、窒素、計装空気、熱媒		○	○

※ What-if、HAZOP の両方に「○」のある項目は、各々の工程の内容によってどちらか1つの手法を採用

※2 CCA(Cause Consequence Analysis)を用いることが想定されたが、安全解析(2)の結果、リスクレベル2に区分された潜在ハザードがなかったため、実施していない。

・リスクレベルの評価

安全解析(1)及び(2)における、リスク評価は、縦軸に「影響の大きさ」、横軸に「発生の可能性」をとり、その組合せによってリスクの大きさ(リスクレベル)を3段階で評価するリスクマトリックス(表 2-3)を採用した。リスクマトリックスは表の右上にいくほどリスクが大きく、左下にいくほどリスクが小さいと評価する。

評価対象とする潜在ハザードは、① PCB の漏洩(作業従事者、周辺住民へ与える影響)、②火災・爆発とした。潜在ハザードが発生した際の「影響の大きさ」と「発生の可能性」を基にリスクマトリックスからリスクレベルを求めた。リスクレベルが2以上の場合は、設計変更を実施する。

表 2-3 リスクマトリックス

施設外	4	周辺住民の PCB 暴露	4	設計変更が必要なレベル		
				A4	B4	C4
施設内	3	施設内の作業従事者と見学者の PCB 暴露	3	詳細検討を実施し、その結果によっては、設備の変更が必要なレベル		
施設内の限定されたエリア内	2	施設内の限定されたエリア内作業従事者の PCB 暴露	2	A3	B3	C3
				リスクレベル 1	リスクレベル 2	
火災・爆発なし	1	作業従事者の PCB 暴露なし	1	十分な安全対策がとられているレベル		
火災・爆発		PCB の漏洩		発生の可能性		
				A	B	C
				複数の類似プラントの一生で起こる可能性はほとんどない(小)	複数の類似プラントの一生で1回程度は起こり得る(中)	当該プラントの一生で1回程度は起こり得る(大)

(3) プラント安全解析の検証結果

ア 安全解析(1)の検証結果

豊田施設「基本設計図書」を基に潜在ハザードについて、リスクマトリックスを用いて基本設計の安全性を評価した。リスクレベル2以上の潜在ハザードについては、そのリスクレベルを低減できる改善案を詳細設計に反映することで、当該施設の安全性の向上を図った。

安全解析(1)の検証結果は以下のとおりであった(表 2-4)。

対象設備の検証対象総数は 2,653 項目であった。本施設の安全性評価結果から、以下のことを判断する。

- ・許容できない大きな影響を与える可能性のあるリスクレベル3に該当するものはない。
- ・検証対象の 99.2%はリスクレベル1であり、現状の対策で十分であると判断する。
- ・検証対象の 0.8%はリスクレベル2であり、リスクレベルを低減できる改善案を詳細設計に反映させた。

安全解析(1)において、リスクレベル2の潜在ハザードは What-if で 5 項目、HAZOP で 17 項目が判明した。

表 2-4 安全解析(1)リスクレベルの検証結果

施設外	4	周辺住民の PCB 暴露	4	0件		
				A4	B4	C4
施設内	3	施設内の作業従事者と見学者の PCB 暴露	3	0件		
施設内の限定されたエリア内	2	施設内の限定されたエリア内作業従事者の PCB 暴露	2	A3	B3	C3
				21件(0.8%)	10件(0.4%)	12件(0.4%)
火災・爆発なし	1	作業従事者の PCB 暴露なし	1	15件(0.6%)		
火災・爆発		PCB の漏洩		発生の可能性		
				A	B	C
				複数の類似プラントの一生で起こる可能性はほとんどない(小)	複数の類似プラントの一生で1回程度は起こり得る(中)	当該プラントの一生で1回程度は起こり得る(大)

イ 安全解析(2)の検証結果

安全解析(2)では、安全解析(1)においてリスクレベル2以上の潜在ハザードに対して設計変更を実施した改善案が、①詳細設計図書に反映されたこと、②リスクレベルが許容できるリスク以下であることを確認した。

豊田施設「詳細設計図書」に対して、安全解析(1)の検証結果のリスクレベル2に該当した22項目の改善案が影響の与える事象(225項目)について、リスクマトリックスを用いて想定される潜在ハザードを再評価した。

安全解析(2)の検証結果は以下に示す(表2-5)。

- ・安全解析(1)においてリスクレベル2以上の潜在ハザードに対して実施した改善案が、適切に詳細設計図書に反映されていることを確認した。
- ・安全解析(1)においてリスクレベル2以上の潜在ハザードに対して実施した改善案に関連する225項目のリスクレベルが1であることを確認し、現状の対策で十分安全であると判断した。

表 2-5 安全解析(2)リスクレベルの検証結果

施設外	4	周辺住民のPCB暴露	4	発生の可能性		
				A	B	C
施設内	3	施設内の作業従事者と見学者のPCB暴露	3	0件	0件	0件
施設内の限定されたエリア内	2	施設内の限定されたエリア内作業従事者のPCB暴露	2	11件(5%)	0件	0件
火災・爆発なし	1	作業従事者のPCB暴露なし	1	20件(9%)	148件(66%)	46件(20%)
火災・爆発		PCBの漏洩				
				複数の類似プラントの一生で起こる可能性はほとんどない(小)	複数の類似プラントの一生で1回程度は起こり得る(中)	当該プラントの一生で1回程度は起こり得る(大)

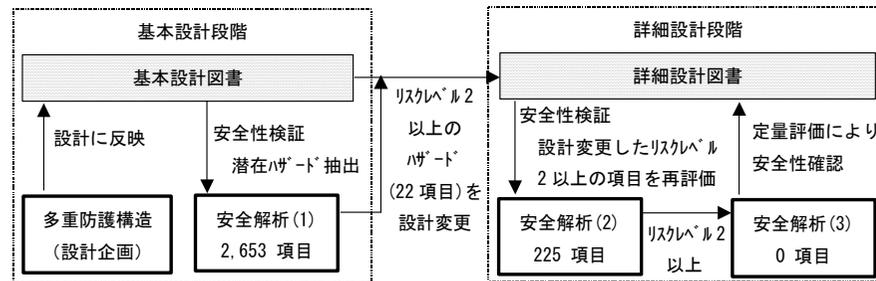


図 2-2 プラント安全解析の結果

2 ハザード発生頻度の確認(定量解析)

プラント安全解析に引き続き、ハザード発生頻度の確認を定量解析により実施した。①施設外へのPCBの漏洩、②施設内での火災・爆発をハザードとして特定し、ハザードの発生がほとんど起こりえない頻度であることを確認するため、図2-3のフローに基づき定量解析を実施し評価を行ったものである。

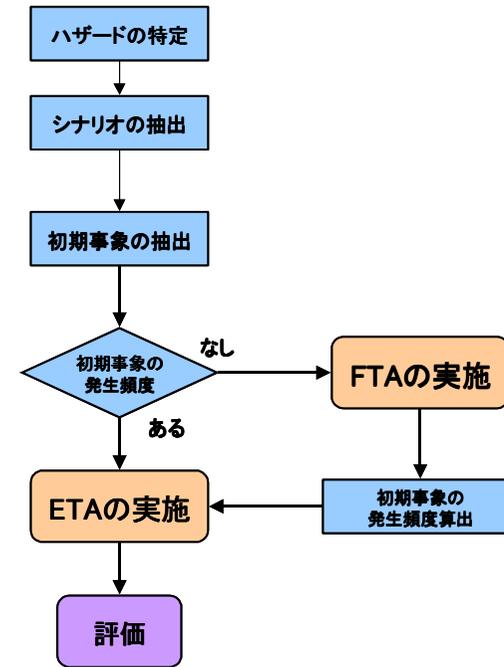


図 2-3 定量解析の実施フロー

ETA (Event Tree Analysis)

初期事象が発生した時、対応の成功・失敗を考慮して事象の進展過程をツリー状に表現し、各々の成功・失敗の確率を使ってハザードに至る発生頻度を解析する手法。

FTA (Fault Tree Analysis)

対象とするシステムに起こってはならない事象を頂上事象として設定し、頂上事象の発生原因を構成機器・部品レベルまで次々と掘り下げ、その原因・結果を論理記号(AND, OR など)で結びつけてツリー状に表現する。次に頂上事象の発生原因となる構成機器・部品レベルの故障確率を与えることにより頂上事象の発生頻度を解析する手法。

なお、今回のFTAは、図2-3に示すようにETAにおける初期事象の発生頻度が不明な場合において、その初期事象の発生頻度を求めるために用いることとした。ETAにおける初期事象をFTAにおける頂上事象として位置づけることにより、FTAにより求めた頂上事象の発生頻度がETAの初期事象の発生頻度になることとなる。

(1) 定量解析シナリオの抽出・初期事象の抽出

豊田施設設計における初期事象（引き金となる事象）の発生からハザードに至るまでのシナリオの抽出は、①施設外への PCB 漏洩については PCB が気化した溶剤に同伴して拡散する可能性のある設備又は PCB を含む排気を処理する設備、②施設内での火災・爆発については運転中に溶剤等の化学薬品を引火点や発火点を超えて使用する可能性のある設備又は水素等の可燃性ガスを発生する設備からそれぞれ抽出した。その結果、表 2-6 に示す 9 種類の主たるシナリオが抽出された。

表 2-6 ハザードに至る可能性があるシナリオ

No.	ハザード	設備/工程名称	主たるシナリオ
1	施設外への PCB の漏洩	真空加熱分離工程	真空加熱炉の窒素ラインの故障により PCB を含む排気のバージが不完全もしくは不能の際に真空加熱炉を開放により、排気中の PCB 濃度が上昇し、排気処理設備の処理容量を越え、かつ、活性炭吸着槽が充填不良であると建屋外漏洩となる。
2	施設外への PCB の漏洩	排気処理設備	オイルスクラバの付帯設備の故障により、スクラバの機能低下もしくは喪失により、排気中の PCB 濃度が上昇し、排気処理設備の処理容量を越え、かつ、活性炭吸着槽が充填不良であると建屋外漏洩となる。
3	施設内での火災・爆発	抜油・解体工程	解体前洗浄槽内の溶剤の温度が引火点以上となり、大気に漏洩して爆発混合気を形成し、着火源により着火すると火災・爆発に至る。
4	施設内での火災・爆発	抜油・解体工程	窒素供給ラインの故障により、解体前洗浄槽に酸素が流入し、気化した溶剤と混合され、爆発混合気を形成し、着火源により着火すると火災・爆発に至る。
5	施設内での火災・爆発	真空加熱分離工程	窒素供給ラインの故障により、真空加熱炉に酸素が流入することで昇温された溶剤と混合され、爆発混合気を形成し、火災・爆発に至る。
6	施設内での火災・爆発	真空加熱分離工程	真空加熱炉のシール性が低下もしくは喪失し、大気を吸引することにより真空加熱炉内部で気化した溶剤と混合され、爆発混合気を形成し、火災・爆発に至る。
7	施設内での火災・爆発	溶剤再生工程	窒素供給ラインの故障により、蒸留塔に酸素を含む排気が流入することで昇温された溶剤と混合され、爆発混合気を形成し、火災・爆発に至る。
8	施設内での火災・爆発	真空超音波洗浄工程	窒素供給ラインの故障により、酸素を含む排気が流入することで気化した溶剤と混合され爆発混合気を形成し、着火源により着火すると火災・爆発に至る。
9	施設内での火災・爆発	液処理設備	窒素供給ラインの故障により酸素が主後処理槽に流入し、反応時に生成した水素と混合され爆発混合気を形成し、着火源により着火すると火災・爆発に至る。

(2) 定量解析の手法

定量解析の手法としては、国内外において広く活用されている ETA と FTA を用い 9 種類の各シナリオについて定量解析を実施し評価を行った。また初期事象となるポンプ やバルブ等の機器の故障確率は、OREDA-97*のデータを用いることとした。ただし、これに該当するものがない場合は、工学的又は経験的な判断値を用いることとした。

※ OREDA-97 (Offshore Reliability Data OREDA-97 Handbook)

ノルウェーの北海油田で操業する石油会社の共同組織で運営され、沖合設備に使用される装置の信頼性データ（故障確率）を収集したもの。

(3) 定量解析の検証結果

9 種類の主たるシナリオにおいて当該設備の構成機器の故障など様々な原因によるシナリオの発生頻度を算出することで総合的なハザードの発生頻度を評価した。

ハザード発生頻度の定量解析の結果は表 2-7 に示したとおりであり、①施設外への PCB 漏洩の発生頻度は、2 つの主たるシナリオの合計となり 1.2×10^{-9} 回/年、②施設内の火災・爆発（爆発混合気の燃焼）の発生頻度は、7 つの主たるシナリオの合計となり 5.3×10^{-7} 回/年であった。これらのハザードの発生頻度は共に 10^{-7} 回/年以下のオーダーであり、英国のリスク基準において無視できるリスクレベルと評価される 10^{-6} 回/年以下であった。したがって、豊田施設はこれらのハザードに対して十分に安全性が確保されているレベルであることが確認できた。

表 2-7 定量解析結果

No.	ハザード	内容		ハザードの発生頻度 [回/年]
		設備名称	主たる引き金事象	
1	施設外への PCB 漏洩	真空加熱分離工程	真空加熱炉バージ用バルブ故障閉	8.5×10^{-15}
2	施設外への PCB 漏洩	排気処理設備	循環ポンプ故障時切替ミス	1.2×10^{-9}
	施設外への PCB 漏洩	小計(1)		1.2×10^{-9}
3	施設内での火災・爆発	抜油・解体工程	第1再生溶剤クーラーバルブ故障閉	1.2×10^{-13}
4	施設内での火災・爆発	抜油・解体工程	窒素製造装置故障	1.1×10^{-10}
5	施設内での火災・爆発	真空加熱分離工程	窒素製造装置故障	1.8×10^{-7}
6	施設内での火災・爆発	真空加熱分離工程	オイル冷却ラインポンプ故障	4.7×10^{-10}
7	施設内での火災・爆発	溶剤再生工程	窒素製造装置故障及びコンデンサー冷却水バルブ故障閉	3.5×10^{-7}
8	施設内での火災・爆発	真空超音波洗浄工程	窒素製造装置故障	6.9×10^{-13}
9	施設内での火災・爆発	液処理設備	窒素製造装置故障	5.9×10^{-14}
	施設内での火災・爆発	小計(2)		5.3×10^{-7}
	合計=小計(1)+小計(2)			5.3×10^{-7}

以上

「ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理施設の安全設計について」

環境事業団ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理事業検討委員会（平成15年8月）

安全設計の基本的な考え方

1) 安全設計の考え方

各地域に整備される PCB 廃棄物処理施設の満足すべき技術的条件及び環境・安全対策については、事業検討委員会報告書及び各地域の事業部会報告書により具体的にとりまとめられており、これらを踏まえた施設の安全設計とする必要がある。

具体的には、リスクマネジメントの考え方に立ち、本質的に安全な処理プロセスとなるような「プロセス安全設計」を基本として、その操業を監視する「操業監視システム」、さらに機器の誤動作やヒューマンエラーが事故につながらないような「フェイルセーフ」機能、万一トラブルが発生しても影響を最小限に抑える「セーフティネット」機能を加えた多重の防護構造による、通常の化学プラントと比べより高い安全性を確保することが必要である。

また、通常運転時に想定される様々な異常発生に加えて、不可抗力による自然災害や緊急事態を想定し、施設の安全な停止ができ、施設外への影響を最小限に抑えることのできる設計とすることが必要である。

2) 安全設計を確認するための安全解析の考え方

PCB 廃棄物処理施設においては、上記のような多重の防護構造を取り込んだ安全設計により、想定される様々なリスクに対応した高い安全性が確保されていることを確認するため、設計業務の一環として施設の安全解析を行うこととしている。

安全解析では、施設の設計全体について問題点がないことを確認するとともに、より高い安全性を確保する観点から設計上及び運転管理上改善すべき点を見だし、その結果を設計及び運転管理に反映させることが重要である。

さらに、このような改善による効果も踏まえて、施設内での火災・爆発、施設外への PCB 漏洩につながるようなトラブルの発生がほとんど起こりえない確率であることを定量的に確認することが重要である。

これらの点を考慮して、施設を構成する工程の特性に応じた、適切な手法による安全解析を実施しなければならない。

3) 安全解析結果の活用

安全解析では、起こり得る様々なリスクを想定して、施設を構成する各工程の安全性を詳細に確認することにより、安全解析結果から、各工程における具体的な留意箇所を明らかにすることができる。

そのような留意箇所に対して、対策の効果や確実性を考慮して、安全性をより向上させるために、設計上又は運転管理上の最適な改善策を講じることが重要である。

設計上の対策としては、安全のための検知機器を追加すること、より信頼性の高い機器に変更することなどが考えられるが、機器を追加する場合には当該機器の維持管理の負担が増加するため、運転管理上の対策とのバランスを考慮し、対策の有効性を十分検討した上で設計に反映させる必要がある。

運転管理上の対策としては、安全解析の結果を日常点検に反映して確実な点検を行うこと、保守点検時の部品の点検頻度や交換頻度の決定に反映させることなどが考えられ、これらの対策を運転マニュアル等に記載するなどにより、確実に実施されることにしておくことが必要である。

また、このような対策の充実に加えて、HAZOP 等の安全解析の結果は、実際にトラブルが発生した場合にその原因の推定及び対応策の検討にも活用できるものであり、トラブル時の迅速かつ適切な対応に活用できるよう整理しておくことが必要である。

これらの対策を通じて、想定したリスクの回避、低減化を最大限に図ることが必要である。

ポリ塩化ビフェニル処理事業検討委員会事務局
105-0014
東京都港区芝1丁目7番17号 住友不動産芝ビル3号館
日本環境安全事業株式会社 事業部 安全・技術開発課
TEL 03-5765-1930 FAX 03-5765-1941
<http://www.jesconet.co.jp>